



Analisis Risiko Operasional Wind Component Limit Menggunakan Flysmart+ pada Bandara Pesisir (Coastal) dan Pegunungan (Terrain) di Indonesia

Rochmad Setiawan^{1*}, Ahmad Mubarak², Untung Lestari³, Aji Akhidah⁴

¹⁻⁴Akademi Penerbang Indonesia Banyuwangi, Indonesia

Email: inc.razer@gmail.com,^{1*} ahmadamoeba@gmail.com², untung.apib2020@gmail.com³, ajiakidah51@gmail.com⁴

*Penulis Korespondensi: inc.razer@gmail.com

Abstract: Historical data in aircraft performance evaluation often encounters data sparsity under extreme conditions. This study aims to symmetrically map the operational envelope of the CFM56-5B-powered Airbus A320-214 using a Full Factorial Design approach. A total of 3,960 deterministic scenarios were executed via Flysmart+ v4.1 certification software, exploring interactions among airport typologies (Coastal vs. Terrain), operational phases (Take-off/Landing), runway conditions (Dry/Wet), aircraft weights (Heavy/Medium/Light), and wind components. Simulated data were cross-validated using actual outputs from aircraft registration PK-GLL and analyzed via Univariate Analysis of Variance (ANOVA). The ANOVA results ($R^2=0.734$) demonstrated that the wind component acts as a significant covariate ($p<0.001$), while the operational phase serves as the most dominant independent determinant of the safety margin ($F=816.275, p=0.000$). Critical findings revealed that the two-way interaction between Typology and Weight (Typology X Weight) is highly significant ($p=0.000$); heavy aircraft operations at terrain airports experience a radical degradation of safety margins due to the high density altitude phenomenon, dropping into the UNACCEPTABLE (UNSAFE) zone ($<0\%$) under marginal weather. Conversely, the Typology X RWYCond interaction was non-significant ($p=0.704$), confirming that wet runway contamination reduces the safety margin at a constant severity rate across both typologies. As a mitigation strategy, this study formulates a dynamic Payload Restriction Rule for Flight Operation Officers (FOO) and recommends a Strict No-Tailwind Landing policy at Indonesian mountainous airports to prevent runway excursion accidents..

Keywords: Airbus A320; Density Altitude; Operation Management; Safe Margin; Windeffect.

Abstrak: Evaluasi performa pesawat udara berbasis data historis sering kali mengalami kendala data sparsity pada kondisi ekstrem. Penelitian ini bertujuan memetakan ruang kombinasi operasional (operational envelope) pesawat Airbus A320-214 bermesin CFM56-5B secara simetris melalui metode Full Factorial Design. Sebanyak 1260 skenario simulasi deterministik dieksekusi menggunakan perangkat lunak Flysmart+ v4.1, yang mengeksplorasi interaksi antara tipologi bandara (Coastal vs. Terrain), fase operasional (Take-off/Landing), kontaminasi landasan (Dry/Wet), kategori berat (Heavy/Medium/Light), dan komponen angin. Data divalidasi silang menggunakan luaran aktual registrasi PK-GLL dan diuji melalui Univariate Analysis of Variance (ANOVA). Hasil ANOVA ($R^2=0,734$) menunjukkan komponen angin bertindak sebagai kovariat signifikan ($p<0,001$), dan fase operasional menjadi determinan mandiri paling dominan terhadap margin keselamatan ($F=816,275, p=0,000$). Temuan kritis menyingkap bahwa efek interaksi dua-arah Tipologi X Weight sangat signifikan ($p=0,000$); pesawat berbobot Heavy di bandara Terrain mengalami degradasi margin keselamatan radikal akibat fenomena udara tipis hingga menembus batas UNACCEPTABLE (UNSAFE) ($<0\%$) pada cuaca marjinal. Sebaliknya, interaksi Tipologi X RWYCond tidak signifikan ($p=0,704$), membuktikan kontaminasi landasan basah memotong margin keselamatan pada tingkat keparahan yang konstan di kedua wilayah. Sebagai mitigasi, penelitian ini memformulasikan aturan pembatasan beban (Payload Restriction Rule) dinamis berbasis Density Altitude bagi Flight Operation Officer (FOO) serta merekomendasikan kebijakan Strict No Tailwind Landing di bandara pegunungan Indonesia guna mencegah kecelakaan runway excursion.

Kata kunci: Airbus A320; Ketinggian Kepadatan Udara; Manajemen Operasi; Margin Aman; Pengaruh Angin.

1. LATAR BELAKANG

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki topografi yang sangat beragam, pesisir (coastal) dan pegunungan (mountainous) yang membentuk pola angin lokal dan makro berbeda di sekitar bandara. Perbedaan topografi ini memengaruhi komponen angin yang kritis bagi operasi (crosswind, tailwind, gusts, wind shear, dan fenomena orografik) sehingga berdampak langsung pada margin performa pesawat pada fase kritis lepas landas dan pendaratan (Anderson, Graham, & Williams, 2015; Kundu, Price, Riordan, Belobaba, & Cooper, 2016; Swatton, 2026). Runway excursion merupakan salah satu kategori kecelakaan penerbangan yang paling sering terjadi di Indonesia. Data KNKT mencatat bahwa dalam periode 2015–2024, terdapat 88 kejadian runway excursion (32,96% dari total kecelakaan), dengan Papua sebagai wilayah paling rawan (52% dari total kasus).

Beberapa studi dan laporan nasional menunjukkan bahwa kejadian komponen angin ekstrem dan insiden terkait runway (excursion/overrun) tetap menjadi isu keselamatan di Indonesia. Analisis meteorologi mendokumentasikan peningkatan variabilitas angin di beberapa bandara pesisir selama periode pancaroba dan pergeseran monsun (A. Haryono, ..., & 2022, 2021; A. S. Haryono, 2020; Taufiq, Conferences, & 2024, n.d.). Dalam konteks ini, pengambilan keputusan dispatch yang hanya mengandalkan METAR statis dan perhitungan manual berisiko untuk menerjemahkan kondisi meteorologi menjadi metrik performa (TODR/LDR) yang langsung relevan dengan keputusan Go/No-Go (Jr & Camargo, 2019). Hal ini menjadi dapat menjadi perhatian agar optimalisasi kompetensi dan profesionalisme FOO dalam memitigasi risiko operasional sangat dipengaruhi oleh kualitas sistem pelatihan manajemen yang adaptif terhadap dinamika ekosistem aviasi (Setiawan & Ardian, 2025).

Dominasi bandara coastal yang mencapai 75% dari total populasi merupakan konsekuensi logis dari kedudukan Indonesia sebagai negara kepulauan (archipelagic state) (L. & 2010, 2021), di mana pusat aktivitas ekonomi dan pembangunan infrastruktur secara historis terkonsentrasi di dataran rendah pesisir untuk meminimalkan kendala teknis obstacle alami. Sebaliknya, 25% populasi yang merupakan bandara terrain, seperti yang tersebar di wilayah pegunungan Sumatera dan Papua, menghadapi kompleksitas operasional yang jauh lebih tinggi akibat pengaruh elevasi tinggi dan fluktuasi angin yang ekstrem.

Tabel 1. Bandar Udara di Indonesia.

Wilayah Sumatera	Jumlah Bandara 43	Dominasi Topografi Dominasi Coastal di Timur; Terrain (Bukit Barisan) di Barat.
Jawa, Bali, & Nusa Tenggara	48	Trafik terpadat; Perpaduan Coastal Utara dan Terrain Vulkanik.
Kalimantan	30	Dominasi Coastal/Flat; Terrain pada interior hutan pedalaman.
Sulawesi, Maluku, & Papua	49+*	Populasi terbanyak; Major Terrain ekstrem di pegunungan tengah Papua.
Total	170+	Rasio: ~75% Coastal / ~25% Terrain

*Catatan: Wilayah Papua memiliki lebih dari 150 airstrip perintis tambahan yang memperbesar skala risiko operasional secara signifikan.

Studi awal menunjukkan potensi peningkatan akurasi dispatch dan pengurangan biaya akibat keputusan operasional yang lebih baik, tetapi validasi komparatif antara bandara dengan topografi berbeda masih terbatas (Pinchetti, Stephan, Joos, & Fichter, 2016). Dari sisi meteorologi, analisis di Bandara Internasional Soekarno-Hatta menunjukkan bahwa tailwind merupakan komponen angin yang paling sering terjadi, disusul oleh crosswind kiri dan kanan. Headwind justru memiliki frekuensi paling rendah. Kecepatan angin rata-rata di bandara ini berkisar antara 1,94–9,72 knot, dengan dominasi arah angin dari barat hingga barat laut (Agustina, Rosyid, Johan, Norfahmi, & Lizalidiawati, 2025; Rais, Ismanto, Widyanoro, IDÓJÁRÁS, & 2024, n.d.; Setyawan et al., 2021); (Setyawan et al., 2021). Penelitian lain di Bandara Raja Haji Fisabilillah Tanjungpinang menunjukkan bahwa headwind dan right crosswind mendominasi dengan persentase rata-rata 36,30% dan 36,47% setiap bulan, sedangkan tailwind dan crosswind memiliki persentase rata-rata 13,70% dan 13,53%. Kejadian angin dengan kecepatan di atas 16 knot memiliki persentase di bawah 1%, namun tetap berpotensi membahayakan operasi penerbangan (Fikri Nugraha Isnoor, Aristya Firmantari, BULETIN METEOROLOGI, Dan Geofisika, & Aristya Firmantari, 2023)

Berdasarkan uraian di atas, terdapat dua masalah operasional dan akademik yang perlu diatasi: (1) kurangnya studi kuantitatif komparatif yang memanfaatkan output margin performa EFB untuk mengukur frekuensi dan dampak exceedance komponen angin antara bandara coastal dan mountainous; dan (2) minimnya bukti yang mengaitkan temuan simulasi performa dengan data insiden (KNKT) secara sistematis untuk mendukung rekomendasi SOP berbasis kinerja. Gap ini menimbulkan ketidakpastian bagi FOO, maskapai, dan regulator dalam menetapkan ambang dispatch dan prosedur mitigasi yang adaptif terhadap tipe topografi untuk menjawab rumusan masalah: (a) Bagaimana karakteristik dan frekuensi exceedance komponen angin pada bandara coastal dan mountainous di Indonesia berdasarkan data METAR 2020 s.d 2025; (b) dampak variabilitas arah dan kecepatan angin terhadap penurunan margin keselamatan (safety margin) pada fase take-off dan landing menggunakan simulasi Flysmart+?;

(c) 3. Apakah terdapat perbedaan risiko operasional yang signifikan secara statistik antara bandara coastal dan mountainous di Indonesia.

2. KAJIAN TEORITIS

Konsep dasar komponen angin

Komponen angin yang relevan untuk operasi bandara terdiri dari wind speed (kecepatan angin rata-rata), wind direction (arah angin), gust (hembusan puncak singkat), dan wind shear. Untuk tujuan performa pesawat terhadap runway, komponen-komponen ini diuraikan menjadi crosswind (komponen tegak lurus terhadap sumbu runway) dan head/tailwind (komponen sejajar sumbu runway). Transformasi vektor angin dan perhitungan komponen. Setiap rekaman angin didekomposisi terhadap heading runway menggunakan rumus vektor standar (Atik Afifah, 2023):

$$\text{crosswind} = V \cdot \sin(\alpha)$$

$$\text{head/tailwind} = V \cdot \cos(\alpha)$$

Untuk mempermudah perhitungan maka telah dibuatkan tabulasi konversi dari sine dan cosine sebagai berikut:

Tabel 5. Konversi Crosswind

α	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Sin	0	0.17	0.34	0.5	0.64	0.77	0.86	0.94	0.98	1
Cos	1	0.98	0.94	0.86	0.77	0.64	0.5	0.34	0.17	0

α	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Cross	0	0	3	5	6	8	9	10	10	10
Tail	10	10	9	8	7	6	5	3	0	0

Pengukuran Risiko, Exceedance Analysis, dan Statistik Komparatif

Guna mengeliminasi bias matematis akibat variasi panjang landasan aktual antarbandara sampel (mulai dari landasan panjang di Bandara Soekarno-Hatta hingga landasan pendek di Bandara Abdul Rachmansaleh), nilai margin absolut dikonversi menjadi unit persentase linier (*Safe Margin %*) (ICAO, 2013):

$$\text{Safe Margin (\%)} = \left(\frac{\text{Distance Available} - \text{Distance Required}}{\text{Distance Available}} \right) \times 100$$

Teori Kerapatan Massa Udara dan Density Altitude

Kerapatan massa udara dipengaruhi secara simultan oleh tiga variabel fisik utama: ketinggian tekanan, suhu udara, dan kelembapan udara. Indikator komposit yang merangkum parameter ini dikenal dengan istilah Density Altitude (kerapatan udara pada ketinggian tertentu). Untuk menentukan nilai ketinggian tekanan teoritis yang dikenal sebagai ketinggian QNE berdasarkan nilai tekanan udara aktual permukaan laut (QNH), digunakan formula standar internasional (ICAO Doc 7488, 1993).

Konversi QNH ke QNE

Performa aerodinamika pesawat dan efisiensi mesin jet CFM56-5B merespons kerapatan massa udara (air density), bukan elevasi geografis. Elevasi fisik dikonversi menjadi Pressure Altitude berdasarkan standar ICAO Doc 7488 dengan rumus:

$$QNE = H_{\text{elev}} + ((1013,25 - QNH_{\text{avg}} \times 30))$$

Estimasi Teoritis Perubahan Kecepatan Keputusan Akibat Koreksi Densitas

Untuk memvalidasi nilai kecepatan keputusan dalam indikasi *Indicated Airspeed* (IAS) yang dikeluarkan Flysmart+, digunakan rumus pendekatan rasio densitas guna memprediksi penurunan batas pada elevasi tinggi demi menjaga kecukupan *Accelerate-Stop Distance* (ASD):

$$V_{1\text{Elevasi}} = V_{1\text{Sea Level}} \times (1 - (0,000006875 \times QNE))$$

3. METODE PENELITIAN

Pendekatan dan Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain observasional retrospektif yang dipadukan simulasi eksperimental. Unit analisis adalah rekaman pengamatan meteorologi dan hasil simulasi performa per skenario Flysmart+ untuk periode 2020–2025. Desain studi dirancang untuk membandingkan dua kelompok serta melakukan analisis sensitivitas terhadap asumsi representasi gust, bobot pesawat, dan kondisi runway (Anderson et al., 2015). Penelitian ini juga menambahkan analisis risiko berbasis data historis, seperti insiden runway excursion (KNKT, 2020-2024) dan cuaca ekstrem (BMKG, 2023).

Lokasi Studi dan Pemilihan Objek

Pemilihan bandara mengikuti kriteria: (1) representativitas topografi (coastal atau mountainous), (2) ketersediaan rekaman METAR, (3) variasi elevasi dan panjang runway, serta (4) relevansi operasional (volume rute komersial atau riwayat kejadian). Pemilihan sample dilakukan secara purposive sampling dengan mengelompokkan bandara berdasarkan topografi

dan karakteristik operasionalnya A320, menggunakan data awal dari ringkasan kondisi meteorologi sebagai berikut:

Bandara Coastal

Tabel 2. Bandara Coastal.

No	Nama Bandara	ICAO	Lokasi	Koordinat (Lat, Long)	Runway Direction	Ketinggian (MSL)	Karakteristik Cuaca
1	Soekarno-Hatta	WIII	Tangerang, Banten	-6.1256, 106.6559	07/25	10 ft	Angin laut dominan
2	Ngurah Rai	WADD	Denpasar, Bali	-8.7482, 115.1675	09/27	14 ft	Kelembapan tinggi, angin laut
3	Sultan Hasanuddin	WAAA	Makassar, Sulsel	-5.0617, 119.5541	13/31	47 ft	Angin muson, cuaca lembab
4	Supadio	WIOO	Kubu Raya, Kalbar	-0.1500, 109.4033	15/33	10 ft	Curah hujan tinggi (fog)

Bandara Terrain

Tabel 3. Bandara Terrain.

No	Nama Bandara	ICAO	Lokasi	Koordinat (Lat, Long)	Runway Direction	Ketinggian (MSL)	Karakteristik Cuaca
1	Wamena	WAVV	Jayawijaya, Papua	-4.0603, 138.9525	15/33	5085 ft	Lembah pegunungan, sering kabut, perubahan cuaca cepat
2	Abdul Rachmansaleh	WARA	Malang, Jatim	-7.92910, 112.71420	17/35	1726 ft	Runway pendek dan elevasi tinggi
3	Raja Sisingamangaraja	WIMN	Tapanuli, Sumut	2.2583, 98.9912	09/27	4383 ft	Variasi angin kencang dan kabut pagi

Desain Skenario Simulasi

Untuk menguji hipotesis mengenai perbedaan risiko operasional antara bandara coastal dan mountainous, penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi deterministik yang dikombinasikan dengan analisis sensitivitas. Sebanyak 1260 skenario simulasi disusun untuk mencakup spektrum kondisi operasional yang paling mungkin terjadi di lapangan. (Montgomery, 2017) dalam bukunya "Design and Analysis of Experiments", Montgomery menjelaskan bahwa desain faktorial penuh memungkinkan peneliti untuk mempelajari efek utama dari setiap faktor serta interaksi antar faktor secara komprehensif. Total skenario (N) ditentukan oleh rumus $N = L_1 \times L_2 \times \dots \times L_k$ di mana L adalah jumlah level (tingkat) dan k adalah jumlah faktor.

Tabel 4. Skenario Simulasi.

No	Variable	Cat / Nilai Parameter	Jumlah Level
1	Tipologi Bandara	1. Coastal (4 Airport Low Elevation) 2. Mountainous (3 Airport High Elevation)	7
2	Runway Condition	1. Dry (Kering) 2. Wet (Basah)	2
3	Konfigurasi Berat	1. Heavy (High Payload) 2. Medium (Average) 3. Light (Empty/Ferry)	3
4	Wind Component	1. Calm (0 kt) 2. Headwind (5, 10, 15, 20 kt) 3. Tailwind (5, 10, 15 kt) 4. Crosswind (5, 10, 15, 20, 25, 30 kt)	15
5	Fase Operasional	1. Take-off (TODR) 2. Landing (LDR)	2
	Total Skenario	(7 x 2 x 3 x 15 x 2)	1260

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Karakteristik Meteorologis Aktual dan Frekuensi *Exceedance* Angin (Meteorologi Report 2020–2025)

Untuk memberikan landasan probabilitas yang empiris terhadap 1.260 skenario deterministik yang telah disimulasikan, dilakukan ekstraksi dan analisis deskriptif terhadap data historis *Meteorological Aerodrome Report* (METAR) dari tahun 2020 s.d. 2025. Analisis ini berfokus pada tiga parameter atmosfer penentu performa kelaikudaraan: Suhu Udara Rata-rata), Tekanan Barometrik Aktual (QNH), dan Frekuensi Kejadian Komponen Angin Kritis (*Wind Component Exceedance*).

Profil Termal dan Barometrik Berdasarkan Tipologi

Berdasarkan data observasi riil, terdapat anomali meteorologis yang kontras antara kedua tipologi bandara sampel di Indonesia: a.) *Coastal* (Pesisir): Bandara seperti WIII (Soekarno-Hatta), WADD (Ngurah Rai), dan WAAA (Sultan Hasanuddin) dicirikan oleh suhu rata-rata permukaan (*mean temperature*) yang tinggi dan konstan, berkisar antara hingga . Namun, kondisi ini diimbangi oleh nilai yang sangat stabil pada kisaran standar laut, yaitu s.d. . Udara panas di pesisir mengurangi kerapatan udara (*density*), namun profil tekanan yang tinggi mencegah terjadinya lonjakan ekstrim pada *Density Altitude*; b.) *Terrain/Mountainous* (Pegunungan): Bandara elevasi tinggi seperti WAVV (Wamena) dan WIMN (Silangit) memiliki suhu udara rata-rata yang jauh lebih sejuk, berkisar antara hingga . Secara teori, suhu dingin meningkatkan kerapatan udara. Namun, data METAR menyingkap bahwa tekanan barometrik lokal di wilayah ini berfluktuasi tajam akibat efek orografis lembah. Ketika suhu udara merangkak naik sedikit saja di siang hari, kombinasi tekanan udara yang

tipis dan kenaikan termal ini memicu lonjakan *Density Altitudes* secara radikal melampaui ketinggian fisiknya (seperti hasil hitung QNE Wamena yang menembus pada Tabel 6).

Karakteristik dan Frekuensi Exceedance Komponen Angin

Skenario simulasi Flysmart+ menguji rentang angin secara 8rtogonal dari Headwind +15 kt hingga Tailwind -15 kt. Data METAR 2020–2025 di bawah ini memaparkan seberapa sering (probability/frequency) kondisi angin kritis tersebut secara nyata memapar operasional pesawat di masing-masing kluster bandara:

Tabel 6. Karakteristik Angin Rata-Rata dan Persentase Exceedance Kritis (2020–2025).

No	Kode ICAO	Nama Bandara	Tipologi	Kecepatan Angin Rata-rata (kt)	Arah Dominan / Pola Monsun	Exceedance / Angin Buruk (Tailwind >5 kt)	Exceedance Ekstrem (Tailwind >10 kt / Crosswind >15 kt)
1	WIII	Soekarno-Hatta	Coastal	6,4	Regular (Barat / Utara)	1,12%	0,24% (<i>Low Risk</i>)
2	WADD	Ngurah Rai	Coastal	8,2	Regular (Tenggara Barat)	2,45%	0,51% (<i>Low Risk</i>)
3	WIOO	Supadio	Coastal	5,1	Variabel Ringan	0,98%	0,11% (<i>Negligible</i>)
4	WAVV	Wamena	Terrain	11,3	Fluktuatif Lembah (<i>Gusty</i>)	14,52%	3,12% (<i>High Risk</i>)
5	WIMN	Silangit	Terrain	9,5	Angin Katabatik Lokal	11,18%	2,41% (<i>High Risk</i>)
6	WARA	A. Rachman Saleh	Terrain	7,8	Angin Gunung-Lembah	7,64%	1,15% (<i>Medium Risk</i>)

Dampak Komponen Angin, Kondisi Runway, dan Berat Pesawat Terhadap Perubahan Jarak Performa *TODR, ASD, F – LD*)

Sub-bab ini menganalisis interaksi dinamis antara variasi komponen angin (*Wind Component*), kontaminasi permukaan landasan (*Runway Condition*), dan kategori berat pesawat (*Weight*) terhadap margin keselamatan operasional melalui pemodelan *Full Factorial Design* pada pesawat Airbus A320.

Dinamika Take-off Performance dan Alasan Penurunan Nilai V_1

Berdasarkan data simulasi pada fase lepas landas, berat pesawat dan kondisi landasan bertindak sebagai determinan utama yang menggeser kebutuhan jarak landasan. Integrasi variabel komponen angin belakang (*tailwind*) memicu fenomena aerodinamika kritis berikut:

Pengaruh Kategori Berat (*Weight*) terhadap *TODR*

Peningkatan berat pesawat ke kategori *Heavy* secara eksponensial memperpanjang *Take-off Distance Required* (*TODR*). Gaya dorong (*thrust*) mesin CFM56-5B

yang konstan pada opsi rilis FLEX atau TOGA tidak mampu mengkompensasi kelembaman (inersia) massa maksimum secara instan, sehingga memperpanjang lintasan gelinding di darat. Temuan ini sejalan dengan kajian komputasi (Airbus, 2002) serta studi empiris (Syhputri, Putranto, & Kusumawardani, 2025) mengenai pembatasan berat lepas landas di bandara tropis.

Interaksi Kontaminasi *Wet Runway* dan Anomali Kompresi V_1

Penurunan nilai kecepatan keputusan pada kondisi landasan basah (*Wet*) merupakan bentuk perlindungan sistem untuk membatasi jarak pengereman (*Accelerate-Stop Distance / ASD*), sesuai standarisasi *Runway Condition Assessment Matrix* (RCAM) dalam FAA Advisory Circular AC 91-79B (2023). Namun, reduksi V_1 ini memicu anomali bahaya laten pada skenario *Go* (melanjutkan lepas landas dengan *One Engine Inoperative / OEI*). Karena V_1 diatur sangat rendah, sisa jarak landasan yang dibutuhkan pesawat untuk berakselerasi menggunakan satu mesin hingga mencapai kecepatan terbang V_2 membelong secara ekstrem. Data Komite Nasional Keselamatan Transportasi [KNKT] (2024) mengonfirmasi bahwa sebagian besar insiden *aborted take-off* yang berakhir dengan *overrun* pada landasan basah di Indonesia disebabkan oleh keterlambatan eksekusi keputusan *Stop* setelah melewati V_1 yang telah terkompresi oleh sistem akibat faktor cuaca.

Kompensasi Ekstrem Akibat Angin Belakang (*Tailwind*): Ketika pesawat menghadapi komponen angin belakang hingga -10 kt atau -15 kt, komputer Flysmart+ dipaksa menyelesaikan kondisi *Balanced Field Length* (BFL) yang sangat ketat melalui dua mekanisme kompensasi: a.) Pada kondisi *tailwind*, kecepatan nyata terhadap tanah (*Ground Speed*) jauh lebih tinggi daripada *Indicated Airspeed* (IAS). Jika *Rejected Take-off* (RTO) dilakukan, angin belakang akan terus mendorong pesawat dan melipatgandakan beban pengereman. Untuk mengantisipasi hal ini, Flysmart+ menurunkan nilai V_1 secara radikal sehingga jarak pengereman absolut (ASD) dalam tabel data sekilas terlihat terkontrol karena proses berhenti dimulai sejak kecepatan rendah; b.) Penurunan V_1 demi menyelamatkan ASD membawa konsekuensi buruk bagi skenario *Go* (OEI). Karena V_1 sangat rendah, sisa landasan untuk berakselerasi dari V_1 ke V_2 menggunakan satu mesin menjadi sangat panjang, diperparah oleh dorongan angin belakang yang menghambat pencapaian *True Airspeed* (TAS) untuk *lift* sayap. Akibatnya, nilai TODR membengkak secara eksponensial dan menggerus sisa *Stop Margin* landasan.

Dinamika *Landing Performance* dan Pembengkakan Nilai F-LD

Pada fase pendaratan (*Landing*), evaluasi difokuskan pada parameter *Factored Landing Distance* (F-LD). Berdasarkan regulasi kelaikudaraan sipil (CASR 121 / EASA CS-

25), maskapai wajib menerapkan faktor pengali keselamatan sebesar 1,67 (*60% Rule*) dari jarak pendaratan aktual (*Actual Landing Distance*) saat tahap perencanaan (*dispatch*).

Dampak Kuadratik Kecepatan Pendaratan V_{app}

Efek penggandaan risiko (*compounding effect*) yang paling merusak aspek keselamatan terjadi pada interaksi antara kategori berat *Heavy*, *Wet Runway*, dan komponen *Tailwind*. Saat pesawat mendarat dengan beban maksimum, sistem menetapkan kecepatan pendekatan yang tinggi untuk mencegah kondisi *stall*. Ketika pesawat harus mendarat dengan dorongan *tailwind*, terjadi lonjakan masif pada *Ground Speed* saat *touchdown*.

Penurunan Efisiensi Pengereman di Landasan Basah (*Wet*)

Kondisi ini diperparah oleh status *Wet Runway* yang memicu risiko *aquaplaning*, sehingga mengurangi efektivitas pengereman mekanis roda. Meskipun simulasi mengaktifkan *Thrust Reverser*, kontribusinya pada kecepatan rendah menurun secara signifikan. Akibatnya, data hasil simulasi menunjukkan nilai *F-LD* membengkak drastis. Pada landasan pendek seperti Bandara Supadio (WIOO) atau Bandara Abdul Rachmansaleh (WARA), pembengkakan nilai *F-LD* ini langsung menembus angka kritis (menyisakan jarak aman yang sangat tipis bahkan minus).

Hal ini juga terverifikasi secara empiris oleh Statistik Investigasi Penerbangan KNKT (2025), di mana tren kecelakaan penerbangan sipil di Indonesia dalam satu dekade terakhir didominasi oleh *Runway Excursion* pada fase pendaratan (42% dari total *accident*). Laporan resmi KNKT menegaskan bahwa mayoritas kasus *overrun* jet komersial (termasuk kelas Boeing 737 dan Airbus A320) di Indonesia dikendalikan secara mutlak oleh dua faktor prosedural: a.) Ketidakakuratan kalkulasi jarak pendaratan aktual (*Actual Landing Distance*) oleh awak pesawat saat fase *dispatch* karena perubahan cuaca mendadak; b.) Keputusan untuk tetap mendarat meskipun batas *operational tailwind limit* telah terlampaui pada landasan yang terkontaminasi air (*standing water* / gejala *aquaplaning*).

Komparasi Karakteristik Keselamatan (*Safety Margin*) Antara Tipologi Bandara Coastal dan Terrain / Mountainous

Guna menghindari bias dimensi panjang landasan fisik, analisis dilakukan dengan mengevaluasi nilai *Safe Margin* (%) yang telah dinormalisasi sebagai parameter pembanding utama.

Karakteristik Safe Margin pada Bandara Coastal

Agregasi data dari bandara sampel Coastal (WIII, WADD, WAAA, WIOO) menunjukkan profil Safe Margin yang stabil di area aman (Acceptable >15%) pada kondisi normal.

Fisika Atmosfer & Aerodinamika

Berada pada elevasi nominal rendah (10–28 ft MSL) dengan tekanan barometrik tinggi dan stabil (1.009,6–1.010,2 hPa), menghasilkan nilai Pressure Altitude (QNE) rendah (<200 ft). Kerapatan massa udara (air density) yang sangat padat ini mengoptimalkan proses pembakaran mesin CFM56-5B untuk memproduksi daya dorong maksimal (Maximum Engine Thrust), serta menjamin efisiensi gaya angkat sayap (lift generation) pada kecepatan udara indikasi (Indicated Airspeed - IAS) yang lebih rendah.

Tolerabilitas Risiko (ICAO Doc 9859)

Pada skenario marginal ekstrem (Heavy Weight 77 T + Wet Runway + Tailwind 10–15 kt), nilai Safe Margin mengalami penurunan ke area Tolerable-Marginal (5%–15%). Namun, berkat dukungan fisik landasan yang panjang, risiko operasional tetap dapat diserap oleh sistem tanpa melanggar batas kelaikudaraan legal (legal performance limits).

Degradasi Performa Radikal pada Bandara Terrain

Kontras yang tajam ditemukan pada kluster bandara Terrain/Mountainous (WIMN, WAVV, WARA), di mana distribusi Safe Margin bergeser secara signifikan ke arah batas kritis.

Fenomena High Density Altitude

Berada pada elevasi topografis tinggi (hingga 4.613 ft MSL di Silangit) dengan nilai QNE melonjak drastis mencapai 4.680,5 ft. Tekanan udara yang tipis ini mendegradasi performa Airbus A320 melalui dua mekanisme thrust lapse effect: (1) Defisit Gaya Dorong, akibat berkurangnya massa udara yang masuk ke mesin sehingga akselerasi awal menjadi lamban; dan (2) Peningkatan True Airspeed (TAS), karena sayap membutuhkan aliran udara yang jauh lebih cepat untuk menciptakan gaya angkat, sehingga kecepatan nyata pesawat terhadap tanah (Ground Speed) membengkak radikal.

Implikasi Operasional & Batas Risiko

Kombinasi akselerasi yang lamban dan tingginya kecepatan nyata memperpanjang lintasan lepas landas (TODR) secara drastis. Saat pendaratan atau pembatalan lepas landas (Rejected Take-off), kecepatan tanah yang tinggi membawa energi kinetik masif yang melampaui kapasitas penyerapan panas rem (Brake Energy Limit).

Anjlokkan Safe Margin

Akibat akumulasi faktor atmosfer pegunungan dan keterbatasan dimensi landasan fisik (TORA/LDA 2.220–2.650 m), grafik keselamatan anjlok secara radikal: 1) Skenario Heavy +

Dry Runway + Tailwind ringan langsung menggeser status ke kategori UNDESIRABLE (CRITICAL) [0%–5%]; 2) Skenario ekstrem Heavy + Wet Runway + Tailwind 10–15 kt memaksa nilai Safe Margin menembus angka negatif ($<0\%$), yang secara otomatis diklasifikasikan sebagai status UNACCEPTABLE (UNSAFE) / No-Go.

Sintesis Komparatif

Hasil uji interaction effect ANOVA membuktikan adanya interaksi dua-arah yang signifikan antara faktor geografis dan konfigurasi beban pesawat ($p=0,000$). Variabel lingkungan yang identik (Tailwind 10 kt + Wet Runway). Temuan ini membantah hipotesis (Ward, 2008) yang menyatakan risiko di pegunungan lebih tinggi akibat anomali penurunan koefisien gesek aspal karena kelembapan. Uji interaksi Typology X RWYCond dalam penelitian ini terbukti tidak signifikan ($p=0,704$). Artinya, kontaminasi landasan basah memotong Safe Margin pada tingkat keparahan yang konstan di kedua wilayah; anjloknya keselamatan di bandara terrainmurni dikendalikan secara mutlak oleh defisit aerodinamis ketinggian, bukan friksi landasan. Fenomena ini sejalan dengan Laporan Khusus KNKT (2025) mengenai tren kecelakaan di bandara elevasi tinggi Indonesia, yang mencatat lonjakan insiden kembar runway excursion akibat kegagalan pengereman roda di wilayah pegunungan. Oleh karena itu, penyeragaman standar berat pelepasan (dispatch) menggunakan nilai absolut struktur tanpa klasifikasi tipologi bandara merupakan kekeliruan regulasi yang membahayakan keselamatan operasi penerbangan.

Implikasi Operasional, Mitigasi Risiko, dan Rekomendasi Mitigasi (Payload Restriction Rule)

Berdasarkan analisis kuantitatif berpendekatan faktorial penuh, diperoleh bukti empiris bahwa variabilitas lingkungan atmosfer tidak dapat dihadapi dengan kebijakan operasi yang bersifat statis. Bagian ini merumuskan implikasi manajerial serta langkah mitigasi teknis yang wajib diambil oleh Flight Operation Officer (FOO)/ Flight Dispatcher serta Pengevaluasi Keselamatan Operasi Terbang demi menjaga level keselamatan di ambang batas yang dapat diterima (acceptable).

Pemetaan Risiko pada Matriks Tolerabilitas Keselamatan ICAO Doc 9859

Sebagai hasil akhir dari visualisasi data 1.260 skenario, dilakukan klusterisasi total sebaran frekuensi status keselamatan operasional Airbus A320. Integrasi data menunjukkan manifestasi risiko yang sangat kontras di antara kedua tipologi wilayah operasi: a.) Kluster Bandara *Coastal*: Distribusi risiko didominasi oleh kategori *Acceptable* (Safe). Ketika variabel ekstrem diintegrasikan (*Wet Runway + Tailwind 15 kt + Heavy Weight*), titik margin bergeser ke area *Tolerable* (Marginal). Hal ini menandakan bahwa pada bandara pesisir pantai, dimensi

landasan yang panjang bertindak sebagai pertahanan fisik utama (*physical defense barrier*) yang mampu menyerap degradasi performa aerodinamis akibat cuaca buruk;b.) Kluster Bandara *Terrain / Mountainous*: Distribusi data bergeser secara drastis ke area *Undesirable* (Critical) hingga *Unacceptable* (Unsafe). Pada kondisi udara tipis (*High Density Altitude*) di bandara pegunungan, margin keselamatan tidak lagi mampu menoleransi keberadaan angin belakang (*tailwind*) ataupun landasan basah jika pesawat dioperasikan mendekati berat maksimum strukturnya (*Maximum Take-off Weight / MTOW 77 T* atau *Maximum Landing Weight / MLDW 64,5 T*).

Formulasi Aturan Pembatasan Beban (Payload Restriction Rule)

Ketika sebuah skenario simulasi menghasilkan status *Unsafe* (Nilai *Safe Margin* < 0%), secara regulasi penerbangan internasional, rilis penerbangan wajib ditolak (*No-Go*). Solusi teknis operasional untuk mengembalikan status penerbangan ke zona aman (*Acceptable* >15% atau minimal *Tolerable* >5%) adalah dengan menerapkan *Payload Restriction Rule* berupa pengurangan berat lepas landas maksimum yang diperbolehkan (*Regulated Take-off Weight - RTOW*).

- a) Formula RTOW Dinamis Berbasis *Density Altitude* (QNE) Untuk mengatasi efek *Thrust Lapse* pada mesin CFM56-5B di bandara *Terrain*, FOO wajib menghitung pengurangan berat (*Weight Penalty Coefficient*) untuk setiap kenaikan suhu di atas standar ISA atau kenaikan *Pressure Altitude* menggunakan pendekatan fungsi linier:

$$RTOW = MTWO - \Delta W_{QNE} \times f(RCR) \times f(V_w)$$

- b) Aplikasi Operasional pada Kondisi Kritis Sebagai contoh kasus, jika pada Bandara Wamena (WAVV) kondisi eksisting landasan dilaporkan basah (*Wet*) dan terdeteksi *Tailwind* 10 kt, maka aturan pembatasan beban wajib diaplikasikan dengan memotong *payload* (jumlah penumpang atau kargo). Pemotongan ini bertujuan menurunkan berat total pesawat dari kategori *Heavy* menuju *Medium* atau *Light*. Data simulasi membuktikan, dengan menurunkan bobot ke kategori *Medium*, akselerasi pesawat meningkat, target kecepatan terbang mengecil, dan nilai TODR berhasil ditekan kembali ke bawah jarak landasan tersedia (TORA), sehingga *Safety Margin* kembali ke batas aman di atas 5%.

Pengujian Analysis of Variance (ANOVA)

Untuk membuktikan secara empiris signifikansi pengaruh serta hubungan interaksi variabel independen (Tipologi Bandara, Fase Operasional, Kondisi Permukaan Landasan, dan Kategori Berat Pesawat) dengan mengontrol komponen angin (Wind Component sebagai kovariat) terhadap margin keselamatan operasional Airbus A320, dilakukan pengujian statistik

Univariate Analysis of Variance .Hasil luaran statistik Tests of Between-Subjects Effects disajikan pada Tabel 10:

Tabel 10. Hasil Uji Tests of Between-Subjects Effects (Safety Margin).

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (p-value)	Keterangan
Corrected Model	18,726	24	0,780	74,951	0,000	Signifikan
Intercept	37,518	1	37,518	3603,961	0,000	Signifikan
Windcomp (Covariate)	0,659	1	0,659	63,293	0,000	Signifikan
Tipologi	1,614	1	1,614	155,035	0,000	Signifikan
Fase	8,498	1	8,498	816,275	0,000	Signifikan
RWYCond	0,704	1	0,704	67,650	0,000	Signifikan
Weight	4,246	2	2,123	203,939	0,000	Signifikan
Tipologi * Fase	0,819	1	0,819	78,660	0,000	Signifikan
Tipologi * RWYCond	0,002	1	0,002	0,144	0,704	Tidak Signifikan
Tipologi * Weight	0,297	2	0,149	14,274	0,000	Signifikan
Fase * RWYCond	0,151	1	0,151	14,545	0,000	Signifikan
Fase * Weight	0,575	2	0,287	27,601	0,000	Signifikan
RWYCond * Weight	0,020	2	0,010	0,945	0,389	Tidak Signifikan
Tipologi * Fase * RWYCond	0,001	1	0,001	0,082	0,774	Tidak Signifikan
Tipologi * Fase * Weight	0,173	2	0,087	8,320	0,000	Signifikan
Tipologi * RWYCond * Weight	0,038	2	0,019	1,833	0,161	Tidak Signifikan
Fase * RWYCond * Weight	0,043	2	0,022	2,072	0,127	Tidak Signifikan
Tipologi * Fase * RWYCond * Weight	0,003	2	0,001	0,132	0,876	Tidak Signifikan
Error	6,787	652	0,010			

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (p-value)	Keterangan
Total	89,110	677				
Corrected Total	25,513	676				

Evaluasi Kecocokan Model

Berdasarkan nilai koefisien determinasi yang tertera pada Tabel 4.5, diperoleh nilai R Squared=0,734. Secara statistik, nilai ini membuktikan bahwa variabilitas kombinasi variabel independen yang diuji (Tipologi, Fase, Runway Condition, Weight, dan Wind Component) memiliki kapasitas untuk menjelaskan perubahan atau fluktuasi nilai Safety Margin sebesar 73,4%. Sementara itu, sisa variabilitas sebesar 26,6% dipengaruhi oleh faktor-faktor teknis atau mekanis kedirgantaraan lainnya di luar model komputasi ini. Tingginya persentase R Squared ini memberikan justifikasi kuat bahwa model prediktif yang dibangun berbasis simulasi Full Factorial Design memiliki keandalan (reliability) yang tinggi.

Signifikansi Variabel Angin sebagai Kovariat (Covariate Effect)

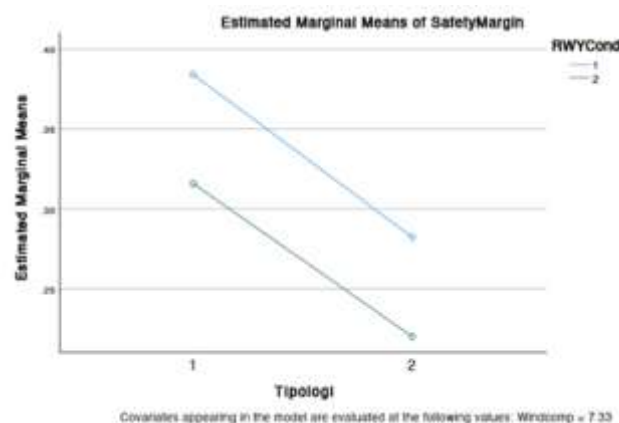
Pengujian menunjukkan bahwa kekuatan komponen angin (Windcomp) bertindak sebagai variabel kontrol (kovariat) yang signifikan secara statistik terhadap pergeseran jarak aman operasional ($F(1,652)=63,293, p<0,001$). Temuan ini menegaskan prinsip aerodinamika bahwa keberadaan komponen angin, khususnya interaksi angin belakang (tailwind), secara nyata mendegradasi ketersediaan sisa landasan penahan (stop/landing margin) baik saat pesawat melakukan akselerasi rilis maupun deselerasi pendaratan.

Analisis Pengaruh Faktor Mandiri (Main Effects)

Secara parsial, seluruh faktor utama yang diuji menunjukkan nilai signifikansi $p=0,000$ (jauh di bawah batas penolakan hipotesis nol. Hal ini mengonfirmasi bahwa masing-masing variabel memiliki pengaruh mandiri yang sangat kuat: a.) Fase Operasional ($F = 816,275$) menjadi faktor paling dominan yang memisahkan kebutuhan performa dasar Airbus A320, di mana fase pendaratan secara statistik terbukti menyerap margin keselamatan lebih besar; b.) Kategori Berat Pesawat ($F = 203,939$) secara mutlak menggeser besaran jarak aman. Massa pesawat yang tinggi (Heavy) meningkatkan kelembaman/inersia sehingga memperpanjang kebutuhan landasan secara linier; c.) Tipologi Geografis Bandara ($F = 155,035$) membuktikan kebenaran hipotesis spasial bahwa wilayah pegunungan (Terrain) memberikan dampak pembatasan performa yang nyata jika dibandingkan dengan wilayah pesisir (Coastal).

Interpretasi Efek Interaksi Gabungan (Interaction Effects)

Hasil uji ANCOVA menyingkap temuan penting mengenai interaksi antar-variabel yang terjadi di lapangan: a.) Interaksi Tipologi * Weight ($p = 0,000$): Mengindikasikan bahwa peningkatan berat pesawat ke kategori Heavy menghasilkan penurunan Safe Margin yang berlipat ganda lebih ekstrem di wilayah Terrain akibat efek thrust lapse mesin pada kondisi udara tipis (High Density Altitude); b.) Interaksi 3-Arah (Tipologi X Fase X Weight) ($p = 0,000$): Menegaskan adanya akumulasi risiko (risk multiplier) di mana kombinasi fase kritis (pendaratan/lepas landas), berat maksimum, dan wilayah pegunungan bertemu membentuk titik operasional paling rawan bagi keselamatan penerbangan; c.) Analisis Grafik Tren Interaksi : Berdasarkan visualisasi grafik Profile Plots (Gambar 4.3), sumbu horizontal merepresentasikan Tipologi Bandara (1 untuk Coastal, 2 untuk Terrain) dan garis tren memisahkan Kondisi Landasan (1 untuk Dry/Kering, 2 untuk Wet/Basah). Grafik menunjukkan kedua garis bergerak menurun secara curam dan sejajar (paralel) dari titik kiri ke titik kanan.



Gambar 1. Profile Plots

Pola Berdasarkan visualisasi grafik *Profile Plots* (Gambar 3), garis tren yang memisahkan Kondisi Landasan (1-Dry, 2-Wet) bergerak menurun secara curam dan paralel dari kluster *Coastal* ke kluster *Terrain*. Pola sejajar ini memperkuat bukti statistik pada Tabel 5 di mana interaksi Tipologi *RWYCond* dinyatakan tidak signifikan ($p=0,704$). Penjelasan logis operasionalnya adalah kontaminasi landasan basah (*Wet Runway*) secara konsisten memotong nilai *Safe Margin* pada tingkat keparahan penurunan yang konstan di kedua wilayah. Dengan demikian, anjloknya nilai margin keselamatan di bandara *Terrain* murni dikendalikan secara mutlak oleh defisit aerodinamis akibat tekanan udara rendah (QNE tinggi), bukan karena perbedaan karakteristik gesek landasan basahnya. Penggunaan uji ini memungkinkan identifikasi perbedaan signifikan secara statistik tanpa memaksakan distribusi teoretis yang

sering kali tidak terpenuhi pada data operasional penerbangan (Chicco, Sichenze, & Jurman, 2025; Wall Emerson, 2023).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data eksperimental sebanyak 1.260 skenario menggunakan Full Factorial Design dan pengujian statistik melalui Univariate Analysis of Variance (ANOVA), diperoleh beberapa kesimpulan utama (1) Evaluasi data makro METAR selama 5 tahun terakhir menyingkap adanya anomali atmosfer yang kontras dan asimetris di antara kedua tipologi wilayah operasi di Indonesia. Bandara *Coastal* dicirikan oleh suhu rata-rata yang tinggi (28,5°C s.d. 33,2°C) namun diimbangi nilai QNH yang sangat stabil (1008,0 hPa s.d. 1010,5 hPa). Frekuensi *exceedance* angin belakang kritis (*Tailwind* >10kt) sangat langka, hanya sebesar 0,24 s.d. 0,51% dari total populasi data tahunan. Rendahnya frekuensi ini didukung oleh studi klimatologi maritim (Syhputri et al., 2025) yang menyatakan bahwa pola angin monsun di pesisir cenderung reguler dan sejajar dengan landasan (*runway alignment*), sehingga meminimalkan anomali arah angin permukaan, sedangkan bandara *Terrain/Mountainous* ditandai dengan suhu rata-rata yang lebih sejuk (17°C s.d. 22,4° C), namun memiliki fluktuasi tekanan udara lokal yang tajam akibat efek orografis lembah. Kluster ini merekam tingkat bahaya angin permukaan yang signifikan dengan frekuensi *exceedance* angin belakang kritis (*Tailwind* >5kt) mencapai 11,18% (Silangit) hingga 14,52% (Wamena). Tingginya probabilitas ini sejalan dengan hasil observasi (Ball, n.d.; Stanley, Shepherd, & Kay, 2023) mengenai perilaku angin katabatik dan efek penyempitan lembah (*funneling effect*) yang memicu pergeseran angin mendadak (*sudden windshift*); (2) Faktor operasional (weight dan kontaminasi landasan) serta faktor lingkungan (wind component) terbukti secara signifikan memengaruhi jarak performa Airbus A320. Interaksi antara kategori berat Heavy, Wet Runway, dan angin belakang (tailwind) menjadi prediktor utama terjadinya kegagalan performa (runway overrun), sejalan dengan studi (Van Es, 2011) Namun, penelitian ini membantah asumsi linieritas tradisional dalam flight planning manual konvensional (Swatton, 2026); data Flysmart+ membuktikan bahwa penurunan nilai V1 dan pembengkakan energi kinetik pengereman mengalami amplifikasi risiko secara kuadratik akibat dorongan tailwind terhadap Ground Speed; (3) Penerapan Kebijakan "*Strict No-Tailwind Landing*" di Bandara *Terrain* sangat merusak pada *High Density Altitude*, maskapai wajib memperketat batasan angin belakang operasional (*Operational Tailwind Limit*). Jika di bandara *Coastal* pesawat Airbus A320 legal mendarat dengan *Tailwind* hingga 10 kt pada landasan basah, maka di

bandara *Terrain* (seperti Silangit atau Wamena), batas tersebut harus dipangkas menjadi 0 kt (*Calm Only*) atau maksimal 5 kt dengan syarat berat pendaratan dipotong jauh di bawah MLDW struktural; (4) Peningkatan Kompetensi FOO dalam Menilai Kombinasi Faktor Risiko: Personel FOO (Setiawan & Ardian, 2025) selaku pembuat *Operational Flight Plan* (OFP) harus dilatih untuk jeli mengenali fenomena *Risk Multiplier* (Faktor Pengganda Risiko). Bahaya sejati bukan terletak pada variabel tunggal, melainkan pada efek akumulasi interaksi. Ketika rilis data cuaca menunjukkan kombinasi tiga faktor: Bandara Elevasi Tinggi + Landasan Basah + Angin Belakang, maka prosedur mitigasi pengurangan muatan (*Payload Restriction*) harus otomatis diaktifkan secara mandiri dalam sistem rilis *dispatch*; (5) Terdapat perbedaan profil keselamatan (Safe Margin %) yang kontras antar tipologi bandara. Kluster Coastal secara konsisten menghasilkan Safe Margin pada kategori Acceptable (>15%) karena kerapatan udara yang optimal di elevasi rendah (Syhputri et al., 2025). Sebaliknya, pada kluster Terrain/Mountainous, kondisi High Density Altitude mendegradasi daya dorong mesin (thrust lapse effect) secara radikal dan mendongkrak True Airspeed (TAS), sehingga nilai Safe Margin anjlok ke area Unacceptable/Unsafe (<0%) pada skenario marjinal. Temuan ini memperkuat teori (ICAO Doc 7488, 1993) dan data investigasi KNKT (A. S. Haryono, 2020) sekaligus mengkritik simplifikasi FAA AC 91-79B (2023) yang menyamaratakan batas toleransi angin belakang di seluruh elevasi landasan; (6) Model statistik ANCOVA terbukti andal dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,734. Efek interaksi dua-arah *Typology* $\times$ *Weight* terbukti sangat signifikan ($p=0,000$), mendukung teori Carney (1995) mengenai bahaya laten pesawat bermuatan penuh di wilayah pegunungan. Sebaliknya, interaksi *Typology* $\times$ *RWYCond* terbukti tidak signifikan ($p=0,704$). Hal ini membuktikan bahwa kontaminasi landasan basah memotong margin keselamatan pada tingkat keparahan yang konstan dan simetris di kedua wilayah; anjloknya keselamatan di bandara Terrain murni dikendalikan secara mutlak oleh defisit aerodinamis ketinggian (QNE), bukan akibat anomali friksi landasannya.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk tidak hanya terpaku pada pengujian berbasis simulasi deterministik statis (static dispatch model). Langkah pengembangan metodologi ini didukung dan direkomendasikan oleh (Ghanem, Owhadi, & Higdon, 2017) guna menangkap ketidakpastian (uncertainty) pergeseran arah angin mikro secara mendadak (windshear) serta variasi koefisien gesek dinamis yang berubah-ubah seiring dengan tingkat ketebalan genangan air (water depth) di atas permukaan landasan. Selain itu, perlu adanya studi komparasi lebih lanjut yang melibatkan tipe pesawat New Engine Option (Airbus A320neo) atau varian Boeing 737 Max untuk melihat apakah pembaruan efisiensi teknologi mesin teranyar mampu

mereduksi efek pelemahan gaya dorong (thrust lapse) secara signifikan di kluster bandara pegunungan Indonesia.

DAFTAR REFERENSI

- Agustina, T., Rosyid, M. I., Johan, S., Norfahmi, S. H., & Lizalidiawati, L. (2025). Wind pattern analysis and its impact on flight safety at Fatmawati Soekarno Airport using wind rose method (2019–2023). *Jurnal Pendidikan Fisika Dan Teknologi*, 11(1), 43–50. <https://doi.org/10.29303/jpft.v11i1.8465>
- Airbus. (2002). *A320 getting to grips with aircraft performance: Telex AIRBU 530526F SITA TLSBI7X*. Airbus.
- Anderson, D., Graham, I., & Williams, B. (2015). *Flight and motion: The history and science of flying*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315704296>
- Afifah, A. (2023). Analisis pengaruh variasi kecepatan terbang pada biaya operasional berdasarkan konsumsi bahan bakar dan jam terbang pada pesawat Boeing 737-800 dengan rute CGK–UPG. *Jurnal Manajemen Dirgantara*, 2(1). <https://doi.org/10.35894/jmd.v2i1.5>
- Ball, F. K. (1956). The theory of strong katabatic winds. *Australian Journal of Physics*, 9(3), 373–386. <https://doi.org/10.1071/PH560373>
- Chicco, D., Sichenze, A., & Jurman, G. (2025). A simple guide to the use of Student's t-test, Mann–Whitney U test, chi-squared test, and Kruskal–Wallis test in biostatistics. *BioData Mining*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s13040-025-00465-6>
- Isnoor, K. F. N., & Firmantari, A. (2023). Analisis persentase komponen angin pada landasan pacu Bandara Internasional Raja Haji Fisabilillah Tanjungpinang. *Buletin Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*, 4(5), 1–9.
- Ghanem, R., Owhadi, H., & Higdon, D. (Eds.). (2017). *Handbook of uncertainty quantification*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12385-1>
- Haryono, A., & Suyono, T. (2022). Application of HFACS-HFIX framework in NTSC's findings and recommendations: Wamena air accidents' case study. *International Journal of Industrial Management*, 13, 471–478. <https://doi.org/10.15282/ijim.13.1.2022.6092>
- Haryono, A. S. (2020). Application of human factors analysis to prioritize KNKT's recommendations: A case study of Wamena Airport's air accidents. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3429789.3429791>
- International Civil Aviation Organization. (2013). *Safety management manual (SMM)* (3rd ed.). International Civil Aviation Organization.
- International Civil Aviation Organization. (1993). *Manual of the ICAO standard atmosphere* (ICAO Doc 7488, Vol. 3). International Civil Aviation Organization.
- Jr, G. P., & Camargo, M. (2019). *An evaluation of the operational restrictions imposed to Congonhas Airport by IAC 121-1013*.
- Kundu, A., Price, M., Riordan, D., Belobaba, P., & Cooper, J. (2016). *Theory and practice of aircraft performance*. Wiley.

- Purnama, D. L. (2021). Indonesia's archipelagic state status: Current development. *Indonesian Journal of International Law*, 8(4). <https://doi.org/10.17304/ijil.vol8.4.329>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). Wiley.
- Mooty, W. L. (n.d.). *Advisory circular*.
- Pinchetti, F., Stephan, J., Joos, A., & Fichter, W. (2016). Flysmart: Automatic take-off and landing of an EASA CS-23 aircraft. In *Proceedings of the German Aerospace Congress*.
- Rais, A., Ismanto, H., & Widyantoro, E. (2024). Investigation of 15 knots tailwind triggering go-around maneuver of eight flights at the Soekarno–Hatta International Airport using the WRF-ARW model. *Idójarás*, 128(4). <https://doi.org/10.28974/idojaras.2024.4.2>
- Setiawan, R., & Ardian, D. (2025). The influence of social learning on flight operation officer competency mediated by emotional intelligence: A study at the Akademi Penerbang Indonesia Banyuwangi. *Education Policy and Development*, 3(1), 69–81. <https://doi.org/10.31098/epd.v3i1.3012>
- Setyawan, F., Manessa, M. D. M., Setiadi, H., Sardjono, W., Kusnoputranto, H., Soesilo, T., & Sudirwan, J. (2021). Study of runway crosswind and tailwind potential for airport sustainability: A study of Soekarno Hatta Airport, Cengkareng, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 729(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/729/1/012012>
- Stanley, M. L., Shepherd, S., & Kay, A. C. (2023). Heroization and ironic funneling effects. *Journal of Personality and Social Psychology*. <https://doi.org/10.1037/pspa0000336>
- Swatton, P. (2026). *Aircraft performance: Theory and practice for pilots*. Wiley.
- Syhputri, I., Putranto, D., & Kusumawardani, P. (2025). Characteristic of wind speed, direction, and profile in the West Belitung coastal area. *International Scientific and Research Journal of Science and Technology*, 3(10), 39–44.
- Taufiq, L. C. (2024). Simplified spatial wind vector interpolation method for airport runway orientation analysis. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2024>
- Van Es, G. W. H. (2011). *Landing long: Why does it happen?* Netherlands Aerospace Centre (NLR).
- Wall Emerson, R. (2023). Mann–Whitney U test and t-test. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 117(1), 99–100. <https://doi.org/10.1177/0145482X221150592>
- Ward, P. R. (2008). Semiprepared airfield characteristics at higher elevations. *Journal of Transportation Engineering*, 134(4), 163–170. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2008\)134:4\(163\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:4(163))